

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Konetekniikan koulutus

Joonatan Väyrynen

Metallien 3D-tulostus lankatulostusmenetelmällä

Opinnäytetyö  
Kesäkuu 2020



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Kesäkuu 2020**  
**Konetekniikan koulutus**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä  
Joonatan Väyrynen

Nimeke  
Metallien 3D-tulostus lankatulostusmenetelmällä

Toimeksiantaja  
Karelia-amk

**Tiivistelmä**

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli löytää tulostusparametrit metalli-muovikomposiitin tulostamiseksi sekä tarkastella tulosteiden lujuutta. Valmistusprosessissa 3D-tulostamalla valmistetaan kappale, josta sideaineenpoiston jälkeen sintraamalla saadaan metallinen kappale. Tulostusarvot etsittiin suunnittelemalla ja tulostamalla standardin mukainen vetokoekappale. Tulostusmateriaalina käytettiin BASF Ultrafuse 316LX, joka on kehitysversio 3D-tulostimille suunnatusta metallikomposiittilangasta.

Opinnäytetyön teoriaosassa esitellään 3D-tulostus valmistusmenetelmänä, käytettävä valmistustapa sekä sen soveltaminen metallisten kappaleiden valmistukseen. Lisäksi esitellään mekaanisen testauksen perusteet. Kokeellisessa osuudessa käsitellään tulostusarvojen muokkausta valmiiden kappaleiden aikaansaamiseksi sekä ulkoisen laadun parantamiseksi. Tulostusparametrien haun haasteellisuutta lisää vähäinen saatavilla oleva ennakkotieto materiaalista. Tulostusarvot, joilla tulostus onnistui ovat materiaalivalmistajan lämpötila-asteikon yläpäästä.

Löydetyillä tulostusarvoilla tulostettiin koekappaleita mekaanista testausta varten, ja näille koekappaleille suoritettiin vetokoe. Vetokokeen tuloksista havaittiin suurta vaihtelua lujuudessa sekä venymissä verrattuna ruiskuvalettuihin koekappaleisiin. Vetolujuuden vaihtelut selittyvät valmistusmenetelmästä johtuvista kappaleen sisäisistä virheistä kuten huonosti toisiinsa kiinnittyneistä kerroksista ja materiaalin epätasaisesta syötöstä.

Kieli	Sivuja	29
Suomi	Liitteet	1
	Liitesivumäärä	3

Asiasanat  
3D-tulostus, teräs, vetokokeet, jauhemetallurgia



**THESIS**  
**June 2020**  
**Degree Programme in Mechanical Engineering**  
Tikkariinne 9  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
+ 358 13 260 600 (switchboard)

Author  
Joonatan Väyrynen

Title  
3D-printing of metallic materials using filament printing process

Commissioned by  
Karelia UAS

**Abstract**

The goal of this thesis was to find printing parameters for metal-plastic composite using Kodak Portrait 3D-printer, and test material properties of green parts. In the manufacturing process, a green part is printed, which is then debinded and sintered to get solid metal part.

Printing parameters were searched by printing a standard tensile test piece. The feedstock used was BASF Ultrafuse 316LX which is development version of metal composite filament. The Material is best suited to manufacturing limited production quantities, and low volume functional prototype parts made of steel. The thesis was commissioned by Karelia UAS.

In the theory section, the basics of 3D-printing and its application to producing metal parts is covered as well as basics of mechanical testing. Modifying the printing parameters to achieve complete parts and improve external quality. Lack of prior testing on the used material makes finding of working parameters more difficult. The working parameters were found on the high end of the temperature scale provided by material manufacturer. These parameters were used to print test pieces for mechanical testing, and tensile tests were performed. From the tensile test results, a large variation in maximum stress and elongation values were observed. These variations are caused by internal faults like poorly bonded layers and pauses in material extrusion caused by the manufacturing process.

Language	Pages	29
Finnish	Appendices	1
	Pages of Appendices	3

Keywords  
3D Printing, steel, tensile tests, powder metallurgy

# Sisältö

1	Johdanto .....	5
2	3D-tulostus.....	5
2.1	3D-tulostus valmistusmenetelmänä .....	5
2.2	Lankatulostusmenetelmä .....	6
2.3	3D-tulostus ja tulostintyytit .....	7
2.4	Lankatulostusmenetelmä metallien tulostuksessa .....	9
2.5	3D-malli .....	10
2.6	Tulostusparametrit sekä niiden vaikutus .....	10
2.7	Prosessikuvaus.....	11
3	Lähtökohta .....	12
4	Laitteet ja menetelmät.....	13
4.1	Tulostin .....	13
4.2	Tulostusmateriaalit.....	14
4.3	Vetokoe .....	15
4.4	Sideaineen poisto ja sintraus .....	16
5	Tulostus .....	18
5.1	3D-mallin luominen .....	18
5.2	Siivutusohjelma.....	19
5.3	Ensimmäinen tulostuskerta.....	20
5.4	Toinen tulostuskerta .....	21
5.5	Kolmas tulostuskerta .....	22
5.6	Löydetyt tulostusarvot.....	24
6	Mekaaninen testaus.....	25
6.1	Vetokoe .....	25
6.2	Vetokokeen tulokset .....	26
7	Pohdinta.....	28
	Lähteet.....	29

## Liitteet

Liite 1 Tulostusasetukset

# 1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tulostusarvojen hakeminen Kodak Portrait -tulostimelle, metallisten kappaleiden 3D-tulostuksen laadun parantaminen käyttäessä lankatulostus- eli FFF-menetelmää, sekä mekaanisten ominaisuuksien vertaaminen MIM-menetelmällä (Metal Injection Moulding) ruiskuva-lamalla valmistettuihin komposiittiosiin. Metallien 3D-tulostus on jatkuvasti yleistynyt valmistusmenetelmä vaativia muotoja omaavien kappaleiden valmistamiseksi. Metallien 3D-tulostamiseen on useita menetelmiä, joilla kaikilla on sekä hyötyjä että haittoja.

Nykyisistä menetelmistä metallisten kappaleiden valmistuksessa teollisuudessa 3D-tulostamalla yleisin on jauhepeti-menetelmä (SLM, Selective laser Melting), jossa kappale valmistetaan sulattamalla metallijauhetta kerroksittain laserilla ja lisäämällä uusi kerros jauhetta edellisen päälle. Tässä opinnäytetyössä keskitytään lankatulostus- eli FFF-menetelmään (Fused Filament Fabrication), joka on yleinen muovien 3D-tulostustekniikka. Tämän tulostusmenetelmän etuina ovat laitteiston hinta, saatavuus sekä yksinkertaisuus. Opinnäytetyön toimeksiantaja on Karelia ammattikorkeakoulu.

## 2 3D-tulostus

### 2.1 3D-tulostus valmistusmenetelmänä

3D-tulostus on verrattain uusi valmistusmenetelmä, joka perustuu aineen lisäämiseen, toisin kuin perinteiset aineenpoistoon perustuvat valmistusmenetelmät. 3D-tulostus on pääosin muovituotteiden valmistuksessa käytetty menetelmä, joka on aiemmin yleistynyt teollisuudessa erityisesti

prototyypimallien valmistukseen sekä harrastajien keskuudessa moniin eri käyttötarkoituksiin. 3D-tulostus käsittää monia erilaisia valmistusmenetelmiä, jotka kaikki perustuvat aineen lisäämiseen. [1]

Raaka-aineina voivat toimia niin nesteet, kiinteät aineet kuin jauheetkin menetelmästä ja halutusta kappaleen materiaalista riippuen. 3D-tulostamalla voidaan myös valmistaa sellaisia kappaleita ja muotoja, joita ei perinteisillä menetelmillä ole ollut mahdollista tai kannattavaa valmistaa. 3D-tulostus perustuu monimutkaisten 3D-mallien muuttamiseen sarjaksi päällekkäisiä 2D-kerroksia, jotka sitten yksi kerrallaan tulostetaan toistensa päälle tulostimella. Aineen lisäykseen perustuvia valmistustapoja ja menetelmiä koskevaa termistöä käsittelee standardi SFS-EN ISO /ASTM 52900:2017. [1]

## **2.2 Lankatulostusmenetelmä**

Lankatulostus, eli Fused Filament Fabrication, on yleisin 3D-tulostusmenetelmä muoveilla harrastekäytössä sekä yleinen myös teollisuudessa. Menetelmä tunnetaan myös lankatulostuksena, koska tulostusmateriaali syötetään tulostimeen yleensä noin 1.75 mm paksuna lankana, eli filamenttina. 3D-tulostuksen perustana toimii itse 3D-malli. Mallin voi tehdä melkein millä tahansa ilmaisella tai maksullisella mallinnusohjelmistolla. 3D-tulostus antaa paljon mahdollisuuksia valmistettavien kappaleiden mallinnukseen, suunnittelua rajoittavina tekijöinä ovat yleensä laitteisto sekä maksimikoko. Lankatulostusmenetelmällä kappaleiden valmistus tapahtuu syöttämällä puolisolaa muovia suuttimen läpi kerroksittain tulostusalustalle. Tulostusmateriaali syötetään kelalta suutinyksikölle telan vetämänä, jossa muovilanka lämmitetään haluttuun lämpötilaan sähkövastuksella itse tulostusta varten. Tulostus tapahtuu kerroksittain sulattamalla muovia alustan tai edellisen kerroksen päälle. Puolisula muovi tarttuu edellisiin kerroksiin sekä jähmettyy nopeasti ympäröivän ilman että aiempien kerrosten materiaalin jäähdyttämänä. Näin syntyy kiinteä muovikappale. Menetelmän haittoina on valmiiden kappaleiden huono kestävyys. Tämä johtuu muovin jähmettymisestä kerroksittain. Myöskään kerrosten välinen liitossauma ei ole kestävyydeltään yhtä

vahva kuin kiinteä materiaali. Ruiskuvalamalla valmistetuissa kappaleissa näitä saumoja ei ole. Kappaleeseen muodostuu myös kerroksen sisällä paljon yhtymäsaumoja, jotka vaikuttavat negatiivisesti lujuuteen. Tämän tulostusmenetelmän suosion perustana on laitteiston suhteellinen edullisuus sekä yleensä pieni koko. Myös tulostusmateriaalin helppo saatavuus kohtuulliseen hintaan sekä useat eri materiaalivaihtoehdot ovat vaikuttaneet menetelmän suosioon. [2, 109–136]

Yksi ongelma lankatulostusmenetelmässä on kutistuma, jonka ennustaminen on vaikeaa johtuen materiaaliin jäävistä sisäisistä jännityksistä tulosteen jäähtyessä epätasaisesti sekä kerroksittain. Tämän takia yleensä kappaleista ei saada kovin mittatarkkoja, mutta koekappaleiden perusteella mallin kutistumista voidaan kompensoida muuttamalla mallin mittoja. [2, 109–136]

### **2.3 3D-tulostus ja tulostintyypit**

3D-tulostuksen haittoja valmistusmenetelmänä ovat hidas valmistusprosessi sekä muoveilla heikompi kestävyys verrattuna muun muassa ruiskuvalettuihin tuotteisiin. Tämän takia nykyinen 3D-tulostus menetelmänä ei ole soveltuva sarjatuotantoon kuin poikkeustapauksissa, joissa muiden valmistusmenetelmien käyttö ei ole mahdollista. Toisaalta 3D-tulostus sopii hyvin nopeaan ja halpaan prototyyppien valmistukseen sekä mallikappaleiden valmistukseen pienissä sarjoissa. [2,109–136]

Tätä menetelmää hyödyntäviä 3D-tulostimia on neljää eri tyyppiä, joista kahta käytetään varsin laajasti. Nämä yleisemmät ovat karteeminen, sekä delta - tyyppinen tulostin. Karteeminen tulostin on niin sanotusti perinteinen tulostin, jossa tulostus tapahtuu liikuttamalla joko tulostusalustaa tai tulostinpäätä x, y ja z-akseleiden suunnissa. Liike voidaan toteuttaa joko liikuttamalla tulostinpäätä kaikkien kolmen akselin suhteen, tai liikuttamalla tulostusalustaa, tai näiden yhdistelmänä, kuten käytettävässä Portrait -tulostimessa, jossa x- ja y-liikkeet on toteutettu liikuttamalla tulostuspäätä, jossa suuttimet ovat ja z-liike liikuttamalla tulostusalustaa. [3]

Delta-tyyppin tulostimessa tulostuspää kohdistetaan kolmen pystysuoraan liikkuvan johteen avulla, joissa liikkuvista kelkoista yhdistyy tukitangot tulostuspäähän. Tällöin tulostinpään koordinaatit voidaan määrittää kolmen pallon säteiden avulla, koska kaikki kolme tukitankoa ovat kiinnitetty tulostuspäähän. X-, y-, ja z-liikkeet saadaan aikaan nostamalla ja laskemalla kelkoja johtimilla eri korkeuksille, siirtäen tukitankojen leikkauspistettä haluttuun kohtaan. Delta-tyyppin tulostin kehitettiin suurempia tulostusnopeuksia ajatellen, mutta ne eivät pääsääntöisesti pärjää tarkkuudessa sekä laadussa perinteisille karteesisille tulostimille. Delta-tulostimissa etuna ovat myös korkeampi tulostustilavuus johtuen pystyjohteista, mutta tulostusala on pyöreä. [3]

Harvinaisempia tyyppejä ovat Scara-, sekä polaaritulostimet. Polaaritulostimissa käytetään pyörivää tulostusalustaa, jota voidaan liikuttaa yhden akselin suhteen, sekä z-akselin suhteen liikkuvaa tulostuspäätä. Koordinaatistona käytetään polaarikoordinaatistoa. Tämä tulostustapa on varsin uusi, eikä ole vielä laajassa käytössä. Etuina pääasiassa laitteiston pieni koko, sillä tämän tyyppin tulostimessa ei tarvita kuin kahta johdetta kolmiulotteisen muodon luomiseen. [3]

Scara-tyyppi (Selective Compliance Assembly Robotic Arm) on tällä hetkellä kaikista harvinaisin tulostintyyppi. Scara-tulostimessa tulostuspää on liitetty robottikäsivarren päähän, muistuttaen esimerkiksi teollisuuden hitsaus- tai maalausrobotteja. Scara-tyyppin etuina ovat pieni tilankäyttö varastoituna johtuen akselihohteiden puutteesta, mutta yksi suuri haittavaikutus syntyy robotin varsien takaiskusta suunnanmuutoksissa. Tämä vaikuttaa heikentävästi laatuun. Tämä tulostintyyppi on käytännössä vielä kehitysasteella. [3]



## 2.4 Lankatulostusmenetelmä metallien tulostuksessa

Metallien tulostuksessa tällä menetelmällä pohjana on edelleen muovi- tai vahakomposiitti, johon on sekoitettu käytettävän materiaalin mukaan jopa 80 painoprosenttia metallijauhetta. Itse tulostus tapahtuu samoin kuin muovin tulostuksessa, mutta metallijauhe aiheuttaa useita ongelmia verrattuna pelkän muovin tulostukseen johtuen seoksen jähmeydestä sekä massasta. Myös pelkkään muoviin verrattuna erilainen ominaislämpökapasiteetti vaatii muutoksia tulostusparametreihin. Tulostuksen jälkeen sideaineena toimiva muovi tai vaha liuotetaan pois, ja jäljelle jää vain jauhemetallinen kappale. Jauhemetalli ilman sideainetta on todella haurasta. Tämän takia jauhemetallurgialla valmistettavat kappaleet sintrataan, jolloin metallipartikkelit hitsaantuvat yhteen ja tuloksena on kiinteä metallikappale. Tätä valmistusprosessia kutsutaan standardin SFS-EN ISO /ASTM 52900:2017 mukaan kaksivaiheiseksi, sillä lopputuote joudutaan valmistamaan kahdessa vaiheessa. Jauhemetallin käyttö aiheuttaa omat haasteensa kappaleiden suunniteluun sekä valmistukseen, sillä valmistusprosessin aikana kappaleet kutistuvat. Kutistumien ennakointi on haastavaa metallin kutistuessa sintrauksessa sideaineen materiaalin poiston takia, mutta myös komposiitin kutistuessa alkuperäistä kappaletta tulostettaessa. Kappaleiden hyvän muoto- sekä mittatarkkuuden saavuttaminen muodostuu näin todella vaikeaksi, koska kappale kutistuu kaksi kertaa valmistusprosessin aikana, ja ensimmäinen kutistuminen vaikuttaa luonnollisesti seuraavaan kutistumiseen. [1, 4]

3D-tulostuksen etuna on myös mahdollisuus tehdä kappaleiden sisäosista onttoja tai osittain täytettyjä alueilla, jotka eivät vaikuta lopputuotteen kestävyYTEEN. Näin kappaleista saadaan huomattavasti kevyempiä. Tilavuuden sisäosan täyttöprosenttia sekä täyttökuviota voidaan muokata riippuen kohteesta sekä vaatimuksista. [4]

## 2.5 3D-malli

3D-malli sekä sen tarkkuus vaikuttavat suuresti lopullisen kappaleen laatuun. Yleisin 3D-tulostimissa käytetty mallin tiedostomuoto on STL, eli Stereolithography. STL on muodostunut 3D-tulostuksessa de facto-tiedostomuodoksi, ja sillä on paljon hyviä, että huonoja puolia. STL-tiedostomuoto esittää kolmiulotteiset muodot yksinkertaisesti, sekä helposti siirrettävinä tiedostoina. Myös lähes kaikki 3d-tulostimet sekä cad-ohjelmat tukevat STL-tiedostoja. Huono puoli tiedostomuodossa on tiedoston paljon tallennustilaa vaativa koko riippuen tiedoston muototarkkuudesta suhteessa alkuperäiseen cad-malliin. [2,197–245]

Tämä johtuu STL-tiedoston tavasta esittää kolmiulotteinen kappale kolmionmuotoisina polygoneina. Suurilla mallin muototarkkuuksilla polygonien määrä kasvaa rajusti eritoten kaarevia muotoja sisältävien kappaleiden kohdalla, joka vaikuttaa tiedoston tallennustilavaatimukseen suuresti. STL-muodossa mallin mukana siirtyy myös suuri määrä ylimääräistä tietoa, kuten moninkertaisia kulmia sekä sivuja. Myös monien cad-ohjelmien sisäänrakennettu tiedostomuodon muunnin ei ole tarpeeksi tarkka. Tästä seuraa katkoja mallissa, esimerkiksi epäjatkuvuuksia. Tämän takia STL-mallit täytyy tarkastaa ennen tulostusta tiedostomuotomuutoksen jälkeen, jotta välttyään tiedostosta johtuvista laatuvirheiltä. [2,197–245]

## 2.6 Tulostusparametrit sekä niiden vaikutus

Tulostuspään lämpötila vaikuttaa tulostukseen ratkaisevasti. Liian kylmä suutin voi aiheuttaa katkoksia sekä epätasaista jälkeä johtuen materiaalin laskeneesta juoksevuudesta. Liian kuuma suutin usein aiheuttaa kappaleen niin sanottua valumista, koska materiaali ei jähmety tarpeeksi nopeasti paikalleen, vaan valuu hieman. [5]

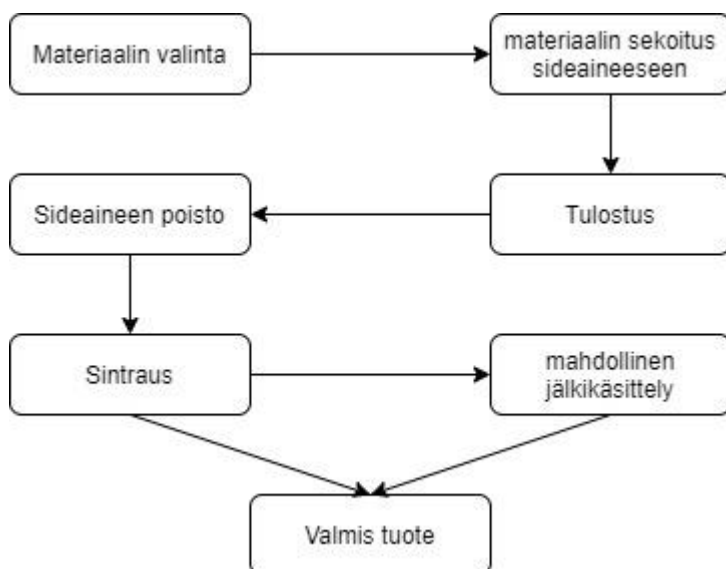
Tulostusalustan lämpötila vaikuttaa eniten tulostuksen alussa kappaleen paikallaan pysymiseen. Kappaleen alimpien kerrosten irrotessa alustasta lopputuloksena on viallinen kappale, johtuen alimmaisten kerrosten liikkumisesta suhteessa päällä oleviin kerroksiin. Materiaalin syöttönopeus sekä tulostuspään vaakaliikkeen nopeus vaikuttavat kappaleen mittatarkkuuteen suuresti. Liian alhainen syöttönopeus suhteessa sivuttaisliikkeeseen aiheuttaa onttoja kohtia ympäri kappaletta, sillä suuttimen materiaalipalko ei ole riittävän kokoinen. Liian suuri syöttönopeus suhteessa liikkeen nopeuteen taas aiheuttaa kappaleen turpoamista tai materiaalin kertymistä suuttimen ympärille, koska materiaalia yritetään ahtaa liikaa liian pieneen tilaan. [5]

## 2.7 Prosessikuvaus

Tulostusprosessi alkaa materiaalin valinnasta. Materiaalin valinnassa on kaksi pääosa-aluetta, itse tuotteen materiaali sekä sideaine. Lopputuotteen materiaalinvalintaan vaikuttaa lopputuotteelta vaadittavat ominaisuudet, kuten esimerkiksi haluttu lujuus, korroosionkesto, mahdolliset sähkön- ja lämmönjohtavuudet. Sideaineen valintaan voivat vaikuttaa esimerkiksi laitteistosta johtuvat rajoitukset, sekä sideaineen poiston vaatimukset. Seuraava askel on jauhomaisen materiaalin sekoitus sidonta-aineeseen, eli esimerkiksi teräsjauheen sekoitus muoviin tai vahaan, joka voidaan muokata tulostimissa käytettäväksi langaksi. Tulostuslankaa saa myös valmiina useita erilaisia, mutta joissakin tapauksissa soveltuvan valmiin komposiitin puute pakottaa valmistamaan tulostuskomposiitin itse. Tulostusmateriaalista tulostamalla saadaan tulostamalla niin sanottu Green part, vihreä kappale, eli raakakappale tulostuksen jälkeen, jossa halutun loppumateriaalin seassa on edelleen sideaine. Sideaine poistamalla saadaan Brown part, ruskea kappale, eli kappale, josta on sideaine poistettu ja jäljellä on vain haluttu lopputuotteen materiaali hauraassa huokoisessa jauhemuodossa. [6, 255]

Sideaineenpoistoon on useita eri tapoja, jotka riippuvat käytettävästä materiaalista. Jotkin vahapohjaiset sideaineet voidaan poistaa käyttäen vain vettä, kun taas toisille tarvitaan esimerkiksi erilaisia happoja liuotukseen. Ruskea

kappale sintrataan, eli huokoinen kappale sideaineen poiston jälkeen hehkutetaan. Sintraus tapahtuu alle materiaalin sulamislämpötilan, mutta korkeassa lämpötilassa jotta huokoinen materiaali hitsautuu diffuusion vaikutuksesta yhteen muodostaen vahvan kiinteän kappaleen. Riippuen tuotteesta, kappaleelle voidaan vielä tehdä lisätyövaiheita, kuten koneistusta, lämpökäsittelyä, hiontaa tarpeen vaatiessa (kuvio 1). [6, 255]



Kuvio 1. Prosessikaavio [6] (Kuvio: Joonatan Väyrynen).

### 3 Lähtökohta

Karelia hankki kaksi uutta 3d-tulostinta käytettäväksi opetuksessa sekä tilaustöiden kappaleiden valmistukseen. Nämä Kodak Portrait-tulostimet on suunniteltu ammattipainotteiseen käyttöön sekä tulostimien helppokäyttöisyyteen on panostettu. Tulostimissa sekä valmistajan omassa siivutusohjelmassa on valmiina tulostusasetukset valmistajan omille materiaaleille. [7]

Työn tavoitteena on löytää tulostusarvot eri valmistajan muovi-metallikomposiitille, jolla voidaan tuottaa tulostamalla teräksisiä kappaleita. Tämän materiaalin vaatimat tulostusasetukset ovat hyvin erilaiset kuin tulostimen oletusasetukset valmistajan materiaaleille. Tätä komposiittimateriaalia on

käytetty tulostuksessa koululla aiemmin vanhemmalla tulostimella, mutta kappaleiden laadussa on ollut vaihtelua sekä pinnanlaatu on ollut heikko. Materiaalivalmistajan mukaan komposiittimateriaali on yhteensopivaa käytettäväksi lähes kaikilla tulostimilla, jotka täyttävät vaatimukset. Näitä vaatimuksia ovat minimissään 250 celsiusasteeseen lämmitettävä suutin, sekä vähintään 100 asteeseen lämmitettävä alusta. Hankitut uudet tulostimet täyttävät nämä vaatimukset. [4]

Tässä työssä keskitytään prosessin tuottaman pinnanlaadun parantamiseen. Pinnanlaadun vaikutus kappaleen ominaisuuksiin on merkittävä. Huono pinnanlaatu heikentää kappaletta ja aiheuttaa ongelmia käytön suhteen, jos kappaleen pinnasta ei saada tarpeeksi hyvää. Tulostuksen laatu vaikuttaa myös suoraan hukkaan menevien epäkelvollisten kappaleiden määrään, jota pyritään vähentämään. Pinnanlaatua voi pyrkiä parantamaan monella tavalla, koska suurin osa itse tulostustapahtuman olosuhteista vaikuttavat lopullisen kappaleen laatuun. Myös tulostettavan kappaleen muodot vaikuttavat pinnan laatuun, esimerkiksi pyöreistä muodoista tulee usein sahalaitaisia kerroksittaisen tulostamisen takia. Tulostuksen laatu vaikuttaa myös suoraan kappaleen kestävyYTEEN, koska epäsäännölliset kerrokset ja mahdolliset ontot kohdat kappaleen sisällä vaikuttavat olennaisesti kappaleen kestävyYTEEN. Pinnanlaatu vaikuttaa oleellisesti myös kappaleen ulkonäköön. Rosoinen ja epätasainen kappale kohteissa, joissa osa on lopputuotteessa näkyvällä paikalla vaikuttaa kestävyYDEN lisäksi myös loppukäyttäjän laatuvaikutelmaan sekä haittaa tuotteen ulkonäköä.

## **4 Laitteet ja menetelmät**

### **4.1 Tulostin**

Tulostus suoritetaan Kodak Portrait -3D-tulostimella. Kodakin tulostin on suunnattu ammattikäyttöön, mutta siihen on sisäänrakennettu

helppokäyttöominaisuuksia, jotka tekevät siitä erinomaisen myös harraste- ja opetuskäyttöön. Tulostimessa suutinosi liikkuu hihnojen välityksellä x, y-koordinaatistossa, z-liike on toteutettu tulostusalustan pystysuoralla liikkeellä, jota ohjataan moottorikäyttöisellä kuularuuvilla. Tulostimessa on käytettävissä kaksi 0,4 mm suutinta, joilla esimerkiksi tarvittavat tukirakenteet voidaan tulostaa eri materiaalista. Tulostettavan kappaleen maksimitat ovat 200 mm x 200 mm x 235 mm [8]

Tulostimen tarkkuus vaikuttaa suuresti laatuun. Halvemmilla, harrastekäyttöön tarkoitetuilla tulostimilla usein tulostimen tulostuspään paikoitus on varsin epätarkka, eikä tällöin voi odottaa kovin hyvälaatuisia kappaleita. Tulostimen tarkkuus tarkistetaan tulostamalla koekappale, jonka suunnitellut mitat ovat tiedossa. Näistä kalibrointikappaleista mitataan toteutunut mitta, jota verrataan mallin suunniteltuun tarkkuuteen. Tämän toteutuneen tarkkuuden perusteella voidaan säätää tulostusasetuksia kohti pienempiä eromittoja, tai mukauttaa mallin mittoja ja ottaa eromitat huomioon kappaleen toleransseissa. Kodak Portrait sisältää valmistajan omat kalibrointimallit tallennettuna laitteen sisäiseen muistiin. [8]

## 4.2 Tulostusmateriaalit

Tulostusmateriaalina käytetään BASF Ultrafuse 316LX teräs - muovi komposiittia. Tämä tulostusmateriaali toimitetaan valmiiksi 1.75 mm filamenttina, joka soveltuu käytettäväksi suurimpaan osaan 3D-tulostimista, joissa on 0.4 mm tai vaihdettava suutin. [9,1–3]

Materiaalivalmistajan suositukset tulostusarvoiksi ovat [9]:

Suuttimen lämpötila 215–235 °C

tulostusalustan lämpötila 85–100 °C

tulostuspään nopeus 15–40 mm/s

kerroksen paksuus 100–250 mikrometriä

Materiaali sisältää SAE 316L-standardin mukaista ruostumatonta terästä 80 painoprosenttia.

SAE 316L-standardin mukainen ruostumaton teräs on austeniittinen vähähiilinen teräs. Se sisältää 0,03 % hiiltä, muita seostusmetalleja ovat kromi 16–18 %, nikkeli 10–14 %, mangaani 2 % sekä molybdeeni 2–3 %. 316L teräksen ominaisuuksia ovat hyvä korroosionkesto happoja sekä merivettä vastaan, kohtuullisen suuri myötö- sekä murtolujuus sekä varsin suuri venymä ennen murtumista. Murto- ja myötölujuus rajoittaa materiaalin käyttöä kantavissa rakenteissa varsinkin 3D-tulostettuna koska valmistusprosessi laskee murtolujuutta verrattuna perinteisin menetelmin valmistettuun teräkseen. [10]

Suurin materiaalia heikentävä tekijä on sen matalampi tiheys, joka kertoo ontoista kohdista rakenteen sisällä. Materiaalivalmistaja ilmoittaa tiheydelle vaihteluväliksi 95–99 % vastaavan, perinteisen teräksen tiheydestä. [9]

### **4.3 Vetokoe**

Vetokoe suoritetaan materiaalin sekä tulostuksen laadun vaikutuksen selvittämiseksi kappaleiden kestävyYTEEN. Vetokoe suoritetaan standardin ISO 527-1 mukaan vihreälle kappaleelle, jolloin tuloksista saadaan vertailukelpoisia ruiskuvalettuihin, 316L-terästä sisältävään ruiskuvaluun tarkoitettua materiaalista tehtyihin vetokokeisiin. Tässä opinnäytetyössä testaus rajoitetaan vihreisiin kappaleisiin, joille määritetään käsittelylujuus heti tulostuksen jälkeen. Vetokokeella selvitetään kappaleen mekaaniset ominaisuudet vetämällä vetosauva hajoamiseen asti. Vetomittakoneen antureista saadaan voimakäyrä sekä suhteellinen venymä. Tästä saadusta voima-venymäkäyrästä voidaan määrittää materiaalille venymä, murtovenymä, kimmokerroin sekä myötöraja. [11]

Kimmokerroin lasketaan vetokäyrän alkuosan kulmakertoimesta, ja se kertoo kappaleen muodonmuutoksen kestosta. Kun käyrä alkaa poiketa alkuosan lineaariselta osalta, materiaaliin alkaa muodostua pysyviä muodonmuutoksia. jos tätä voiman arvoa ei ylitetä, kappale palaa alkuperäisiin mittoihinsa, jos kappaleen vetäminen lopetetaan. Jos vetämistä jatketaan, kappaleeseen alkaa

muodostua pysyviä muodonmuutoksia, ja kappale ei palaa enää alkumittoihinsa. Tätä muodonmuutosta kutsutaan plastiseksi muodonmuutokseksi. [12]

Myötöraja kertoo jännityksen arvon, jolla kappaleeseen alkaa muodostua plastista muodonmuutosta, ja materiaali alkaa venyä. Joillakin materiaaleilla, kuten muoveilla, tarkan myötörajan määrittäminen on vaikeaa materiaalin tasaisen myötämisen takia. Tällöin käytetään yleensä  $R_{p0,2}$ -myötörajaa, joka määritetään vetokäyrältä venymän arvosta 0,2 %. Määrittäminen tapahtuu venymäasteikolta, josta vaakakselin venymän 0,2 % kohdalta lähdetään kimmokertoimen kulmakerrointa seuraten, kunnes viiva leikkaa vetokäyrän. Tältä leikkauskohdalta saadaan pystyasteikolta voiman arvo, jolloin kappale on venynyt 0,2 % suhteessa alkupituuteen. Asteikolta luetusta voiman arvosta määritetään jännitys jakamalla voima koekappaleen poikkileikkauspinta-alalla. [13]

Venymä ilmoitetaan yleensä muutosprosenttina verrattuna alkuperäiseen mittaan, joka kertoo kappaleen venymän muutoksen jännityksen suhteen. Vetokoe tehdään usealla eri koesauvalla, jotta tuloksista voidaan verrata tulosten laadun vaikutus lopputuotteen kestävyysasteeseen sintrauksen jälkeen. Koesauvana käytetään standardin DIN 50125 mukaista tyypin E vetosauvaa, jonka mitat ovat määritetty suhteessa toisiinsa. Tämä mahdollistaa vetosauvan koon valitsemisen esimerkiksi tulostimen maksimimittojen tai arvioidun jännityksen avulla vetokoneen tyypin mukaan. [14]

#### **4.4 Sideaineen poisto ja sintraus**

3D-tulostuksen mahdollistava sideaine täytyy poistaa tulostetusta kappaleesta ennen sintrausta. BASF Ultrafusen ensisijainen sideaine, eli niin sanottu muovi poistetaan katalyyttisesti typpihapon avulla samalla tavalla kuin metallien ruiskuvaluun tarkoitettu Catamoldista, jota Ultrafuse 316LX on langaksi muovattuna. Sideaineenpoisto täytyy tehdä hitaasti, jotta kaasunpoistuva sideaine ehtii poistua rakenteesta huokosten kautta. Jos poisto tehdään liian suurella lämpötilalla liian nopeasti, on seurauksena halkeamia ja suurempia huokosia rakenteessa.



Toissijainen sideaine poistetaan sintrauksen yhteydessä pitämällä kappaletta noin 650 celsiusasteen lämpötilassa vähintään kahden tunnin ajan, jotta sideaine ehtii kaasuuntua ja poistua hitaasti huokoisesta kappaleesta. Tämän vaiheen jälkeen alkaa varsinainen sintrausvaihe, jolloin kappale hehkutetaan korkeassa lämpötilassa. [6, 133–178]

Sintrauksessa jauhemetallinen kappale hehkutetaan, jolloin metallipartikkelit hitsautuvat yhteen diffuusion vaikutuksesta. Tällöin saadaan kiinteä, kestävä metallikappale. [6, 133–134]

”Sintrauksessa jauhepuristetta kuumennetaan kontrolloidussa atmosfäärissä pääseosaineen sulamispisteen alapuolella olevassa lämpötilassa tavoitteena puristeen tiivistäminen ja lopullisen lujuuden aikaansaaminen. Prosessissa diffuusio auttaa jauhepartikkeleita sitoutumaan toisiinsa metallisidoksilla, jolloin materiaalin tiheys, lujuus ja sitkeys kasvavat huomattavasti. Tärkeimmät tekijät sintrauksessa ovat lämpötila, aika ja sintrattavaa kappaletta ympäröivä kaasu. Muita sintraukseen vaikuttavia tekijöitä ovat puristeen alkutiheys ja jauheen aktiivisuus sintrautumiseen. Sintrauksen jälkeen kappaleessa on huokosia 5–10 % ja kappaleet ovat yleensä valmiita käytettäväksi. Haluttaessa erikoisominaisuuksia, suoritetaan jatkokäsittelyjä.” [15, 109]

Sintrausparametrit 316L teräkselle [16, 45–50]:

Ilmakehä: 100 % vetyä

huoneenlämpötila -> 3 K/min -> 600 °C, pidetään 2 tuntia

600 °C -> 5 K/min -> 1360 °C, pidetään 2 tuntia

1360 °C -> 15 K/min -> 80 °C, jäähdytys

1. vaiheessa kappaleesta poistetaan niin sanottu toissijainen sideaine, joka on jäänyt kappaleeseen ensisijaisen sideaineen eli muovin poiston jälkeen. Tämä toissijainen sideaine pitää jauhemetallisen kappaleen koossa ennen sintrausta, jotta sitä voidaan käsitellä. lämpötila nostetaan hitaasti kuuteensataan celsiusasteeseen, jotta kaasuuntuva sideaine pääsee poistumaan hitaasti kappaleesta hajottamatta sitä.

2. vaiheessa kappale sintrataan, jolloin lämmön ja vedystä koostuvan kaasukehän vaikutuksesta metallipartikkelit hitsautuvat yhteen ja muodostavat lujan kiderakenteen.

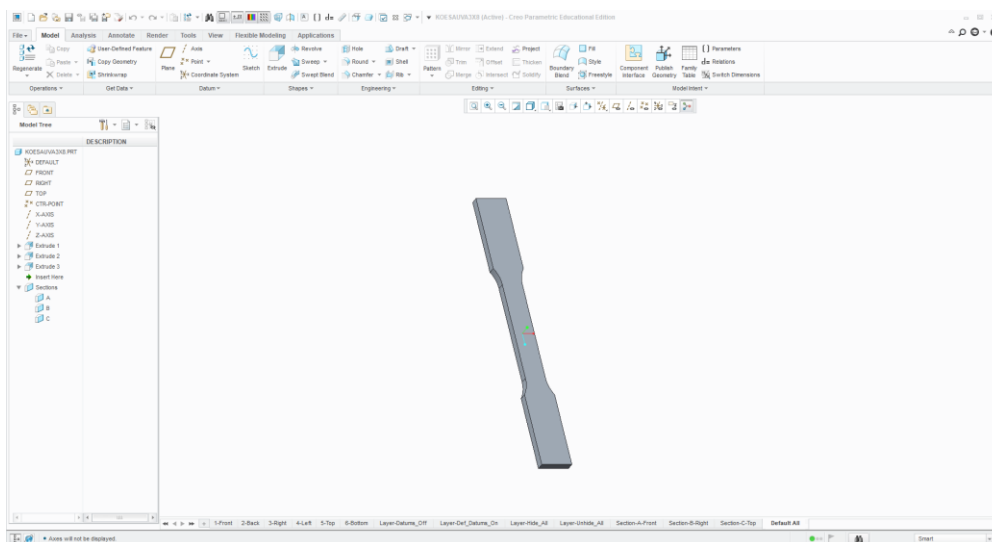
3. vaiheessa sintrattu kappale jäähdytetään hallitusti 80 celsiuksen lämpötilaan asti, ja tämän jälkeen kappale voidaan jäähdyttää huoneenlämpöön ulkona sintrausuunista.

Tässä opinnäytetyössä sintrausta ei kuitenkaan suoriteta, vaan vetokokeet suoritetaan vihreille kappaleille, eli ennen sideaineen poistoa ja sintrausta. [16, 45–50]

## 5 Tulostus

### 5.1 3D-mallin luominen

Vetokoesauvan 3d-malli luodaan PTC Creo Parametric-ohjelmalla (Kuva 2). Creo on yhdysvaltalaisen PTC:n CAD-mallinnusohjelma, joka on laajasti käytössä teollisuudessa. Vetokoesauva mitoitetaan standardin DIN 50125 perusteella, jolloin myöhemmin tehtävistä sintrattujen kappaleiden vetokokeista saadaan vertailukelpoisia raaka-ainetoimittajan tutkimuksiin materiaalin kestävyydestä.

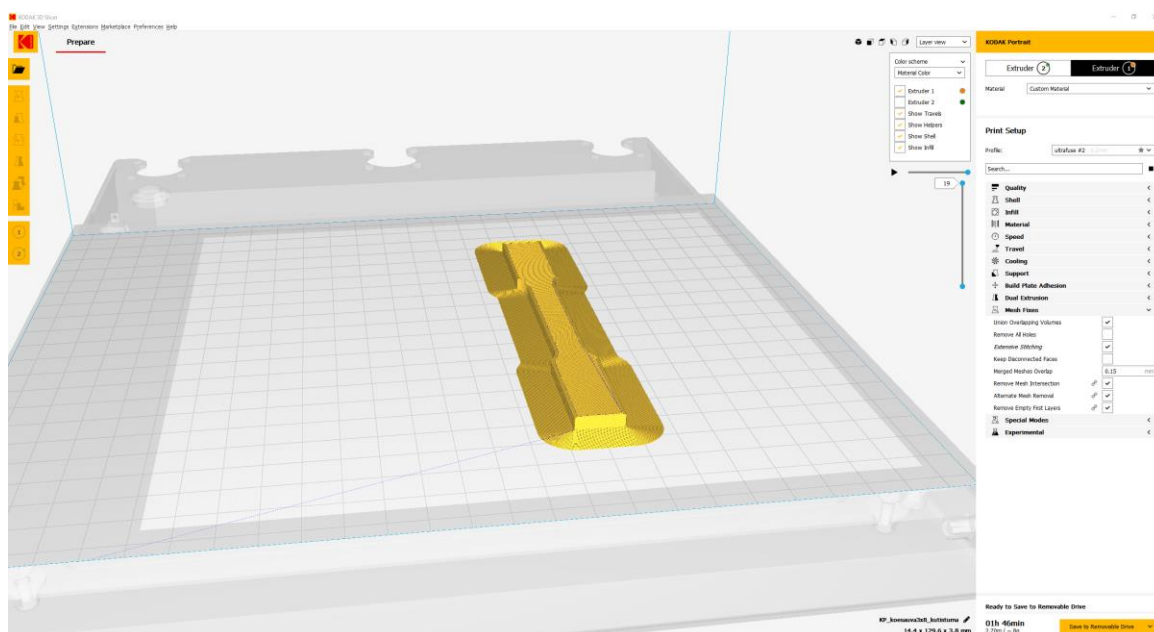


Kuva 2. Mallinnettu koesauva Creossa (Kuva: Joonatan Väyrynen).

## 5.2 Siivutusohjelma

Slicer- eli siivutusohjelmalla käytettiin Kodak 3D Slicer 3.6.6-ohjelmaan, joka perustuu avoimen lähdekoodin Cura-ohjelmistoon. Siivutusohjelma muuttaa STL-tiedostona olevan 3d-mallin tulostimen ohjaukseen soveltuvaksi g-koodiksi. G-koodi sisältää niin sanotun työkalun liikeradan, nopeudet sekä muut tulostusasetukset. Ohjelmassa määritellään kaikki tulostusasetukset sekä voidaan tarkistaa liikeradat kerroksittain (Kuva 3).

Kodak on integroinut siivutusohjelmaan myös STL-tiedoston virheitä korjaavan ominaisuuden, joka pyrkii minimoimaan mallissa olevat virheet, kuten epäjatkuvuuskohdat sekä mahdolliset reiät pintatasoissa, sekä niiden leikkauskohdissa. Tällä ennaltaehkäistään tulostuksen aikana mahdollisia virheellisiä liikeratoja sekä mahdollisten virheellisten muotojen ja reikien syntymistä



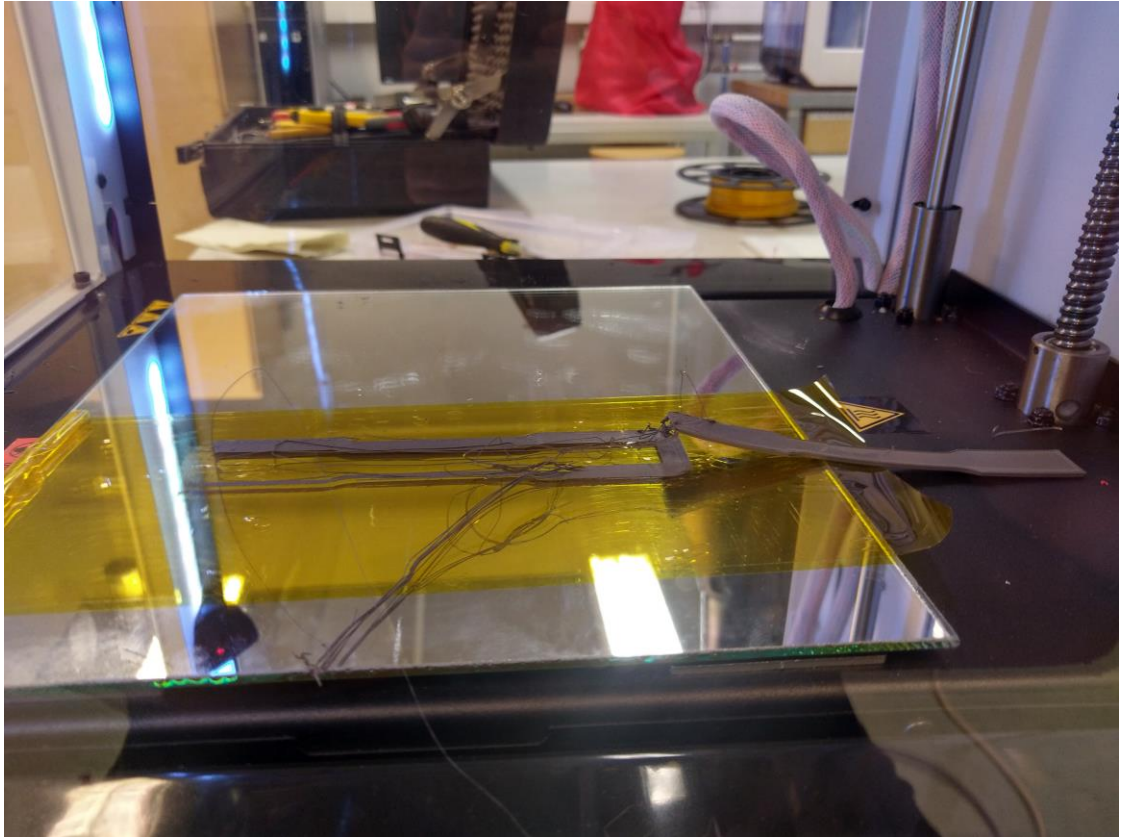
Kuva 3. Kuvankaappaus siivutusohjelmasta (Kuva: Joonatan Väyrynen).

### 5.3 Ensimmäinen tulostuskerta

Alustavat tulostusparametrit valittiin materiaalitoimittajan toimittamien suositusarvojen sisältä. oleelliset tulostusarvot olivat suuttimen lämpötila 230 °C, tulostusalusta lämpötila 100 °C, tulostusnopeus 40 mm/s sekä kerrospaksuus ensimmäiselle kerrokselle 150 mikronia, lopuille kerroksille 200 mikronia. Tulostusalustalle levitettiin polyimidi-teippi materiaalivalmistajan suosituksen mukaisesti. Näillä arvoilla sekä alustateipillä materiaalia roiskui epätasaisesti alustalle, eikä tulostuksesta tullut mitään.

Ensimmäisenä toimenpiteenä tarkastettiin tulostusarvot, sekä tulostimen kalibrointi. Näistä ei löytynyt mitään poikkeavaa, joten seuraavaksi epäilykset kohdistuivat materiaaliin, joka oli ollut avoimessa pahvilaatikossaan. Pahvilaatikossa säilyttäminen altistaa materiaalin ilmankosteudelle, jota materiaali on jonkin verran imenyt. Materiaali kuivattiin kiertoilmauunissa 80 celsiusasteen lämpötilassa noin 3 tuntia, jonka jälkeen materiaalikela suljettuun ilmatiiviiseen muovipussiin kosteudenpoistorakeiden kanssa.

Materiaalin kuivauksen jälkeen tulostus onnistui paremmin, mutta noin 25 % tulostuksen kohdalla kappale alkoi käyristymään kulmistaan. Kappale ei tarttunut alustaan kiinni, ja lopulta suutin tönäisi kappaleen irti alustasta kokonaan, vaikka tulostusarvoissa kappaleen ympärille lisättiin niin sanottu helma (kuva 4). Helman tarkoitus on lisätä tulosteen tartuntapinta-alaa tulostusalustaan.

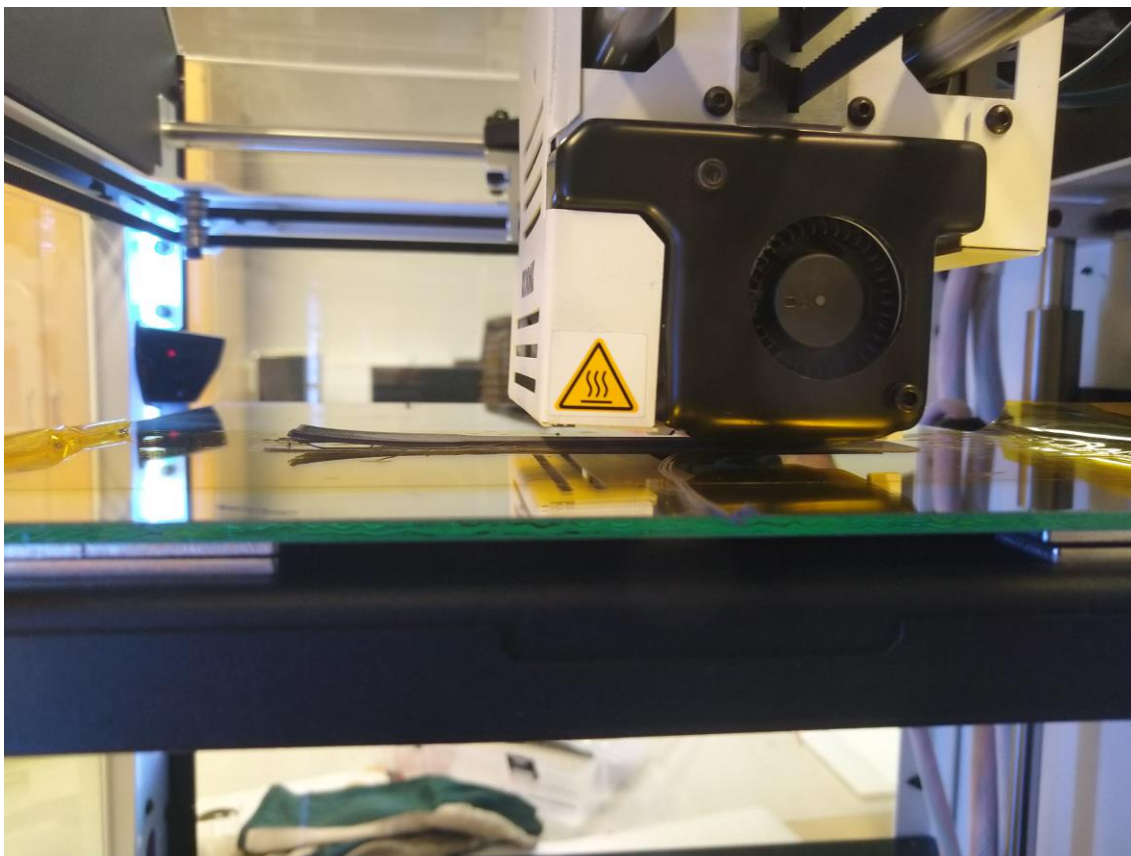


Kuva 4. Irronnut koesauva (Kuva: Joonatan Väyrynen)

#### 5.4 Toinen tulostuskerta

Tulostusarvoja muokattiin, nostamalla suuttimen lämpötila 235 °C ja alustan lämpötila 105 °C, sekä pudottamalla tulostusnopeutta 10 mm/s. Tämän jälkeen tulostusnopeus oli 30 mm/s.

Näillä arvoilla tuloste pysyi pidempään kiinni alustassa, mutta noin puolessa välissä tulostusta kappale alkoi taas käyristyä kulmistaan, joka johti kappaleen irtoamiseen ja tulostuksen keskeyttämiseen (kuva 5).

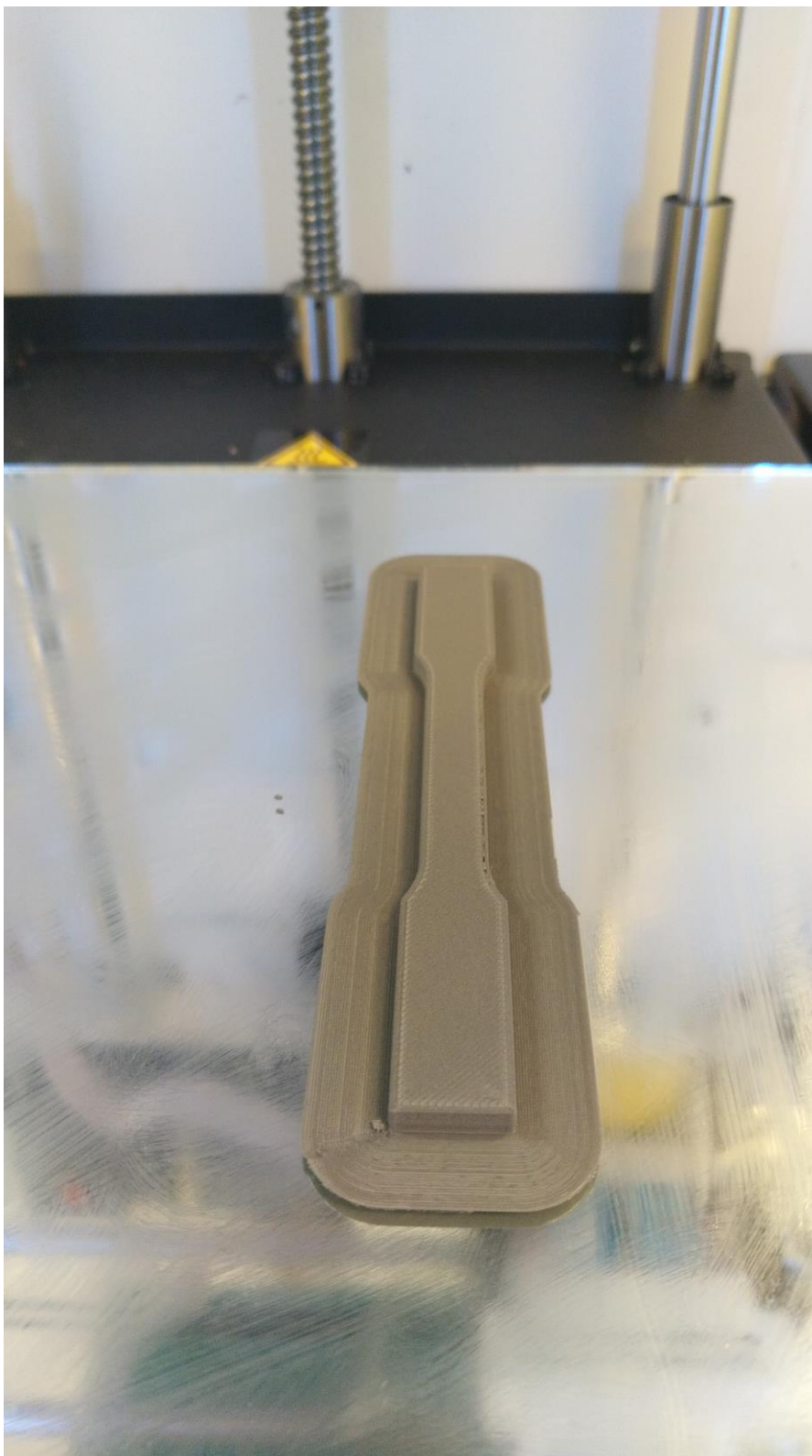


Kuva 5. kulmasta irronnut tuloste (Kuva: Joonatan Väyrynen)

## 5.5 Kolmas tulostuskerta

Tällä kertaa tulostusarvot pidettiin samoina kuin toisella kerralla, mutta polyimidi-teippi jätettiin pois alustasta kokonaan, ja se korvattiin alustalle levitetyllä ohuella liimakerroksella 3D-tulostukseen tarkoitettua Dimafix-liimaa. Näillä muutoksilla tuloste pysyi loppuun asti kiinni (Kuva 6). Valmistetun kappaleen pinnanlaatu oli tyydyttävä, eikä kappaleessa havaittu ulkoisia virheitä.





kuva 6. valmis koesauva (Kuva: Joonatan Väyrynen)

## 5.6 Löydetyt tulostusarvot

Tulostusarvojen etsinnän tuloksen löydettiin tulostusarvot, joilla koesauvat saatiin tulostettua. Näitä tulostusarvoja voidaan käyttää myös muiden kappaleiden tulostamiseen. Tulostuksessa käytetyt tulostusarvot on esitetty kuvassa 7 sekä täydet tulostusasetukset liitteessä 1.

### Tulostusarvot

Lämpötilat	°C
alusta	105
Suutin	235

Kerrospaksuudet	mm
1. kerros+helma	0.15
loput kerrokset	0.20

Täyttö	100 %
täyttökuvio	kerroksittain linjoina 45°, 90° kierto kerrosten välillä

Tulostusviivan leveys	0.35 mm
-----------------------	---------

Tulostusnopeus	mm/s
täyttö	30
ulkoseinä	15
seinän sisäkerros	30
pohja & päällinen	15
ensimmäinen kerros	15

Lisäasetukset	
tartunta alustaan	Helma

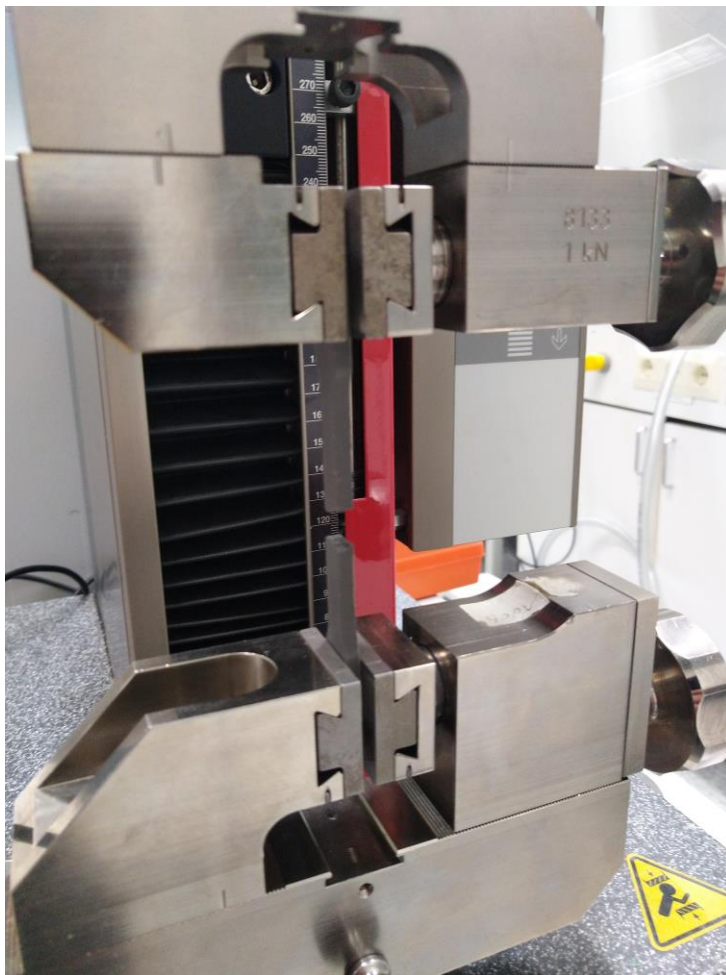
Kuva 7. Tulostusarvot (Kuva: Joonatan Väyrynen)



## 6 Mekaaninen testaus

### 6.1 Vetokoe

Vetokoe tehtiin standardin ISO 527 mukaisilla arvoilla vihreille kappaleille, vetosauvan ollessa standardin DIN 50125 mallin E mukainen. Vetosauvat vedettiin hajoamiseen saakka, jolloin tuloksista saadaan murtovenymä sekä murtovoima (Kuva 7). Vihreistä kappaleista vedetyillä koesauvoilla määritettiin tulostetuille kappaleille käsittelylujuus, joka kertoo kappaleiden kestävyys heti tulostuksen jälkeen.



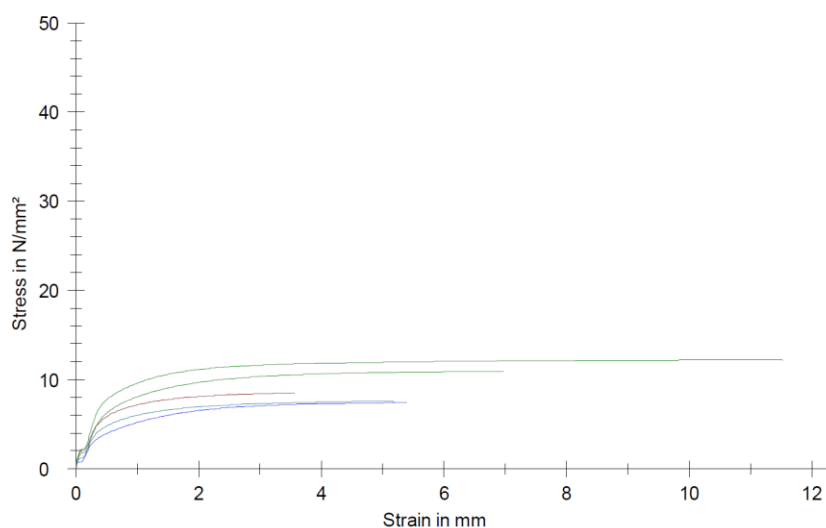
Kuva 7. Murtunut vetokoesauva (Kuva: Joonatan Väyrynen).

## 6.2 Vetokokeen tulokset

Vetokokeessa kaikki koesauvat katkesivat lähes keskeltä. Vetokokeen tuloksien perusteella keskimääräiseksi vetolujuudeksi tuli 9,3 MPa, näyttemäärän ollessa viisi kappaletta. Näytteiden heikoimman kappaleen lujuudeksi saatiin vain 7,38 MPa, kun taas kestävin näyte antoi tulokseksi 12,2 MPa. Myös murtovenymässä havaittiin suuria eroja, huonoimman tuloksen ollessa vain 7,93 % ja parhaan 25,61 %. Vetokoesauvojen tulokset ovat esitetty taulukossa 8, ja venymäkäyrät kuviossa 9.

koesauva	Fmax Mpa	Fbreak Mpa	$\epsilon$ Fmax %	$\epsilon$ Break %
1	10,9	10,92	15,06	15,5
2	7,4	7,43	11,96	12
3	7,6	7,38	11,41	11,52
4	8,5	8,49	7,85	7,93
5	12,2	12,17	25,57	25,61
Keskihajonta	2,127674787	2,162075392	6,763804	6,758822
keskiarvo	9,32	9,278	14,37	14,512

Taulukko 8. Vetokokeen tulokset



Kuvio 9. Vetokokeen jännitys-venymäkäyrät

Suuret erot vetokokeen tuloksissa kertovat sisäisistä virheistä, joita syntyy tulostusprosessin aikana kappaleeseen. Näistä virhekohdista, joita voivat

esimerkiksi olla ontto kohta tai epätasalaatuinen tulostusmateriaali. Myös tulostetun kappaleen kerrosmainen rakenne altistaa materiaalin suuremmalle määrälle virheitä johtuen mahdollisista huonosti toisiinsa tarttuneista kerroksista. Kerrosrakenne myös selittää ainakin osittain suuria eroja koekappaleiden venymissä. Huonosti toisiinsa tarttuneet kerrokset mahdollistavat kerrosten liukumisen suhteessa toisiinsa vetorasituksessa. Tulostuskammion vaihteleva lämpötila on myös luultavasti vaikuttanut kappaleiden laatuun, sillä kammion lämpötila nousee jatkuvasti tulostuksen aikana. Materiaalin kuivuus tulostettaessa voi myös olla yksi tekijä suuriin lujuuden vaihteluihin. Vaikka tulostusmateriaali säilytettiin kuivauksen jälkeen tiiviissä muovipussissa, oli kela altistettuna ilmakehän kosteudelle tulostuksen ajan.

Tuloksia verrattaessa Karelia AMK:n Toiminnalliset pulverimetallurgiset tuotteet MIM2-projektissa tehtyyn tutkimukseen ruiskuvalettujen metallikappaleiden vetokokeisiin, joissa ruiskuvaletun materiaalin vetolujuudeksi oli määritetty 8,3 MPa keskihajonnalla 0,4 vihreille kappaleille.

Tulostamalla valmistettujen kappaleiden lujuus vaihteli siis huomattavasti enemmän kuin ruiskuvalettujen. Murtovenymää tarkastellessa ruiskuvaletut kappaleet tuottivat keskimääräiseksi venymäksi 4 %, kun taas tulostettujen näytteiden murtovenymän arvoksi saatiin 14,51 %. Murtovenymä vaihteli paljon keskihajonnan ollessa 6,76.

Tulosten luotettavuutta arvioitaessa on otettava huomioon verrattain pieni näytemäärä. Tämän takia mittausten keskihajonnan varmuuskertoimeksi luotettavuuden varmistamiseksi on käytettävä kerrointa 1,4. Näin ollen keskihajonnaksi näytemäärälle 5 kappaletta saadaan keskihajonnaksi 2,978. [17, 59]

## 7 Pohdinta

Opinnäytetyön tarkoituksena oli etsiä toimivat tulostusarvot BASF Ultrafuse 316LX-tulostusmateriaalille käytettäväksi Karelialle hankituille uusille Kodak Portrait-tulostimille. Aloitin opinnäytetyön tutustumalla materiaaliin ja tulostimeen, sekä käytettävään 3D-tulostusmenetelmään ja sen perusteisiin.

3D-tulostaminen oli välillä haastavaa, mutta mielenkiintoista. Uuden tulostimen käytön opettelu oli mielenkiintoista, sekä aiemmin menetelmästä hankkimani kokemuksen soveltamista uuden materiaalin käyttöön, josta ei juuri löytynyt ennakkotietoja johtuen käytetyn materiaalin harvinaisuudesta sekä uutuudesta.

Tulostusarvojen hakeminen toteutettiin valitsemalla tulostusarvot ohjearvojen vaihteluvälin keskeltä, ja säätämällä arvoja tulosten perusteella. Menetelmä toimi varsin hyvin työn toteutuksen kannalta, sekä kyseiselle valmistusmenetelmälle. Tulosten luotettavuuden parantamiseksi näytemäärää olisi hyvä lisätä, jotta tulosten luotettavaa keskihajontaa voisi tarkentaa. Tulosten suuri hajonta oli hieman yllätyksellistä, mutta jonkin asteista hajontaa oli odotettavissa kappaleiden kerrosmaisen rakenteen takia. Tämä altistaa kappaleet sisäisille virheille sekä vaihtelevasti toisiinsa tarttuville kerroksille.

Tämän opinnäytetyön ohessa olen tutustunut 3D-tulostukseen sekä ruiskuvaluun valmistusmenetelminä, ja niiden erilasiin käyttökohteisiin. Myös materiaalien testaus, etenkin vetokoe on tullut tutuksi.

Aiheen jatkokehityksessä olisi hyvä kasvattaa näytekokoa, sekä suorittaa vetokoe myös sintratuille koekappaleille. Näin saataisiin verrattua vihreiden kappaleiden lujuuden ja venymien vaihteluita lopputuotteiden sintrattua materiaalin lujuuden vaihteluihin. Sintrattujen lopputuotteiden lujuuden määrittäminen olisi hyödyllinen kappaleiden suunnittelua ajatellen.

## Lähteet

1. SFS-julkaisu. 2017. SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia.
2. Chua, C., Leong, K. 2017. 3D Printing and Additive Manufacturing. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd.
3. Alex, M. 2017. The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar). <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/>. Luettu 20.3.2020
4. BASF New Business GmbH. 2019. Ultrafuse 316L User Guidelines for 3D Printing Metal Parts. <https://www.forward-am.net/wp-content/uploads/2020/05/User-Guidelines.pdf>
5. Jennings, A. 2020. Troubleshooting Guide to Common 3D Printing Problems. <https://all3dp.com/1/common-3d-printing-problems-troubleshooting-3d-printer-issues/> Luettu 20.3.2020
6. Heaney, D. 2012. Handbook of Metal Injection Molding. Iso-Britannia: Woodhead Publishing.
7. Smart International Ltd. 2018. What makes the KODAK Portrait 3D Printer special? <https://www.kodak.com/uploadedFiles/Consumer/3D/3d-printing/3d-printers/Resources/White-paper-What-makes-the-KODAK-Portrait-3D-Printer-special.pdf> Luettu 4.5.2020
8. Mensley, M. 2020. 2020 Kodak Portrait 3D Printer Review: 10-Hour testing. <https://all3dp.com/1/kodak-portrait-review-3d-printer-specs/> Luettu 7.4.2020.
9. BASF New Business GmbH. 2017. Ultrafuse 316LX Technical Data Sheet. [https://www.basf.com/global/de/documents/about-us/Companies/new-business-gmbh/publications/3d-printing/TDS\\_BASF\\_Ultrafuse-316LX.pdf](https://www.basf.com/global/de/documents/about-us/Companies/new-business-gmbh/publications/3d-printing/TDS_BASF_Ultrafuse-316LX.pdf). Luettu 20.1.2020.
10. Global Metals Pty Ltd. 2020. Stainless Steel – 316 / 316L. [http://www.globalmetals.com.au/pdf/Stainless Steel/Stainless Steel 316.pdf](http://www.globalmetals.com.au/pdf/Stainless%20Steel/Stainless%20Steel%20316.pdf) Luettu 2.3.2020.
11. Instron. 2019. Instron. <https://www.instron.us/our-company/library/test-types/tensile-test>. Luettu 10.11.2019
12. ISO-julkaisu. 2012. ISO 527-1:2012.
13. SFS-julkaisu. 2016. SFS-EN ISO 6892-1:2016. Metallien Vetokoe. Osa 1: Vetokoe huoneenlämpötilassa
14. DIN-Julkaisu. 2016. DIN 50125. Testing of metallic materials – Tensile test pieces, English translation of DIN 50125:2016-12
15. Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M., Sihvonen, P. 2011. Valmistustekniikka. Helsinki: Otatieto.
16. Piötter, V. 2016. Tutorial, powder injection molding. Saksa: Karlsruhe Institute of Technology
17. Esala, V., Lehto, H., Tikka, H. 2003. Konepajatekniset mittaukset ja kalibroinnit. Helsinki: Teknologiateollisuus ry

















## Tulostusasetukset

Quality		Infill	
Layer Height	0.2 mm	Infill Extruder	Not overrid... <input type="radio"/>
Initial Layer Height	0.15 mm	Infill Density	100 %
Line Width	0.35 mm	Infill Line Distance	0.35 mm
Wall Line Width	0.35 mm	Infill Pattern	Lines
Outer Wall Line Width	0.35 mm	Connect Infill Lines	<input type="checkbox"/>
Inner Wall(s) Line Width	0.35 mm	Infill Line Directions	[ ]
Top/Bottom Line Width	0.35 mm	Infill X Offset	0 mm
Infill Line Width	0.35 mm	Infill Y Offset	0 mm
Skirt/Brim Line Width	0.35 mm	Infill Line Multiplier	1
Initial Layer Line Width	100.0 %	Extra Infill Wall Count	0
<b>Build Plate Adhesion</b>		Infill Overlap Percentage	0 %
Build Plate Adhesion Type	Brim	Infill Overlap	0 mm
Build Plate Adhesion Extruder	Extruder 1	Skin Overlap Percentage	5 %
Skirt/Brim Minimum Length	250 mm	Skin Overlap	0.0175 mm
Brim Width	10 mm	Infill Wipe Distance	0.0875 mm
Brim Line Count	29	Infill Layer Thickness	0.2 mm
Brim Only on Outside	<input checked="" type="checkbox"/>	Gradual Infill Steps	0
<b>Cooling</b>		Infill Before Walls	<input checked="" type="checkbox"/>
Enable Print Cooling	<input type="checkbox"/>	Minimum Infill Area	0 mm <sup>2</sup>
Regular/Maximum Fan Speed Threshold	10 s	Infill Support	<input type="checkbox"/>
Regular Fan Speed at Height	0.15 mm	Skin Removal Width	0.7 mm
Regular Fan Speed at Layer	2	Top Skin Removal Width	0.7 mm
Minimum Layer Time	5 s	Bottom Skin Removal Width	0.7 mm
Minimum Speed	10 mm/s	Skin Expand Distance	0.7 mm
Lift Head	<input type="checkbox"/>	Top Skin Expand Distance	0.7 mm
		Bottom Skin Expand Distance	0.7 mm
		Maximum Skin Angle for Expansion	90 °
		Minimum Skin Width for Expansion	0.0 mm

## Tulostusasetukset

Material		Mesh Fixes	
Default Printing Temperature	235.0 °C	Union Overlapping Volumes	<input checked="" type="checkbox"/>
Printing Temperature	235.0 °C	Remove All Holes	<input type="checkbox"/>
Printing Temperature Initial Layer	235.0 °C	Extensive Stitching	<input checked="" type="checkbox"/>
Initial Printing Temperature	235 °C	Keep Disconnected Faces	<input type="checkbox"/>
Final Printing Temperature	235 °C	Merged Meshes Overlap	0.15 mm
Default Build Plate Temperature	60.0 °C	Remove Mesh Intersection	<input checked="" type="checkbox"/>
Build Plate Temperature	105.0 °C	Alternate Mesh Removal	<input checked="" type="checkbox"/>
Build Plate Temperature Initial Layer	105.0 °C	Remove Empty First Layers	<input checked="" type="checkbox"/>
Flow	100 %	Speed	
Initial Layer Flow	100 %	Print Speed	30 mm/s
Enable Retraction	<input checked="" type="checkbox"/>	Infill Speed	30 mm/s
Retract at Layer Change	<input type="checkbox"/>	Wall Speed	15.0 mm/s
Retraction Distance	5 mm	Outer Wall Speed	15.0 mm/s
Retraction Speed	45.0 mm/s	Inner Wall Speed	30.0 mm/s
Retraction Retract Speed	45.0 mm/s	Top/Bottom Speed	15.0 mm/s
Retraction Prime Speed	45.0 mm/s	Travel Speed	120 mm/s
Retraction Extra Prime Amount	0 mm <sup>3</sup>	Initial Layer Speed	15.0 mm/s
Retraction Minimum Travel	0.7 mm	Initial Layer Print Speed	15.0 mm/s
Maximum Retraction Count	90	Initial Layer Travel Speed	60.0 mm/s
Minimum Extrusion Distance Window	5 mm	Skirt/Brim Speed	15.0 mm/s
Standby Temperature	175 °C	Maximum Z Speed	0 mm/s
Nozzle Switch Retraction Distance	16 mm	Number of Slower Layers	2
Nozzle Switch Retraction Speed	20 mm/s	Equalize Filament Flow	<input type="checkbox"/>
Nozzle Switch Retract Speed	20 mm/s	Enable Acceleration Control	<input type="checkbox"/>
Nozzle Switch Prime Speed	20 mm/s	Top Surface Skin Acceleration	3000 mm/s <sup>2</sup>
		Enable Jerk Control	<input type="checkbox"/>

## Tulostusasetukset

 <b>Shell</b>	
Wall Extruder	 Not override <input type="radio"/> 
Outer Wall Extruder	 Not override <input type="radio"/> 
Inner Wall Extruder	 Not override <input type="radio"/> 
Wall Thickness	0.8 mm
Wall Line Count	2
Outer Wall Wipe Distance	0.2 mm
Top Surface Skin Layers	0
Top/Bottom Extruder	 Not override <input type="radio"/> 
Top/Bottom Thickness	0.8 mm
Top Thickness	0.8 mm
<i>Top Layers</i>	2
Bottom Thickness	0.8 mm
Bottom Layers	999999
Top/Bottom Pattern	Lines 
Bottom Pattern Initial Layer	Lines 
Top/Bottom Line Directions	[ ]
Outer Wall Inset	0.025 mm
Optimize Wall Printing Order	<input type="checkbox"/>
Outer Before Inner Walls	<input type="checkbox"/>
Alternate Extra Wall	<input type="checkbox"/>
Compensate Wall Overlaps	<input checked="" type="checkbox"/>
Compensate Outer Wall Overlaps	<input checked="" type="checkbox"/>
Compensate Inner Wall Overlaps	<input checked="" type="checkbox"/>
Minimum Wall Flow	 0 %
Fill Gaps Between Walls	Everywhere 
Filter Out Tiny Gaps	<input checked="" type="checkbox"/>
Print Thin Walls	<input type="checkbox"/>
Horizontal Expansion	0 mm
Initial Layer Horizontal Expansion	0 mm
Z Seam Alignment	Sharpest Corner 
Seam Corner Preference	Hide Seam 
Ignore Small Z Gaps	<input type="checkbox"/>
Extra Skin Wall Count	1
Enable Ironing	<input type="checkbox"/>